

接触形態の違いが高含水ハイドロゲルの摩擦へ及ぼす影響

Effect of different contact configurations on highly hydrated hydrogel friction

九州大・工（学）*柿谷 有香 （正）新盛 弘法 （正）鎗光 清道 （正）澤江 義則

Yuka Kakitani, Hironori Shinmori, Seido Yarimitsu, Yoshinori Sawae

Kyushu University

1. 緒言

重度の関節疾患に対する有効な治療方法の一つに人工関節置換術がある。人工関節置換術の施術件数は近年増加傾向にあり、国内でも年間 10 万件以上行われている。しかし、摺動部の摩耗による緩みや可動域の制限などが人工関節の課題として未だに残っている。これらの課題を解決するために、生体関節の潤滑機構を再現した人工関節が提案されている。生体関節は摩擦係数 0.001-0.03 程度の低摩擦であり、80 年以上も動作することができる耐摩耗性に加え、股関節では定常歩行時に体重の 3 倍以上の荷重を支える支持能力も有する¹⁾。これらは、関節内を満たす関節液と骨端部を被覆する関節軟骨の協調作用に由来する。これまでに様々な潤滑メカニズムが提唱されてきたが、潤滑機構の完全な解明には至っていない。そこで本研究では、生体関節の潤滑機構を明らかにすることを目的とし、関節軟骨を高含水性ハイドロゲルでモデル化した摩擦試験を行った。特に接触形態に着目し、平面接触および点接触の 2 種類の異なる接触形態が摺動特性に及ぼす影響を調査した。

2. 実験方法

2.1 試験片・試験溶液

試験片には、関節軟骨と類似の柔軟性及び含水率を有することから、ポリビニルアルコール (Polyvinyl alcohol, PVA) ハイドロゲルをモデル材として用いた。本実験で用いた PVA ハイドロゲルは水素結合を利用した物理架橋ゲルで、架橋剤を用いずに反復凍結解凍法で作成した。試験溶液は、リン酸緩衝生理食塩水 (Phosphate Bufford Saline, PBS) を基剤として、2 種類のタンパク質 (アルブミンと γ -グロブリン) を溶解させたものを用いた。試験溶液の組成は以下に示す通りだ (表 1)。

Table 1 Composition of the test solution

Base	Albumin [wt%]	γ -Globulin [wt%]
PBS	-	-
PBS	1.4	0.7

2.2 試験装置

ハイドロゲルの摩擦挙動は、直接接合が生じる境界潤滑域で特有の速度依存性を示すことが知られている²⁾。本研究では、この速度・摩擦依存性を考慮するために、回転式レオメータ (AntonPaar, PhysicaMCR 301, 302) を摩擦試験機として応用した。本試験では、測定部を変えることで、平面接触状態と点接触状態の 2 種類で PVA ハイドロゲルの摩擦特性が評価可能となる。実験系を図 1, 2 に示す。平面接触状態 (図 1) には平行プレートに直径 10 mm のガラスプレートを、プレート試験片には直径 10 mm, 厚さ 2 mm の PVA ハイドロゲルを用いた。点接触状態 (図 2) には直径 12.7 mm のガラス球を、プレート試験片には 6 mm \times 10 mm, 厚さ 2 mm の PVA ハイドロゲルを用いた。

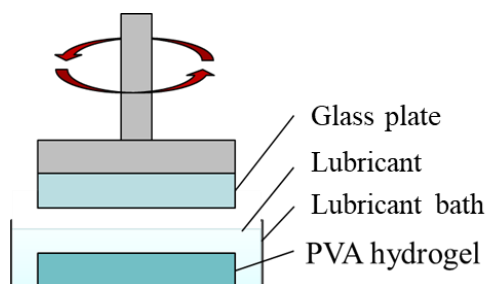


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system (surface contact)

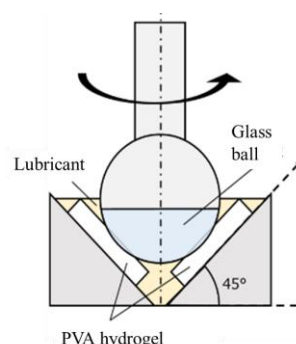


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system (point contact)

2.3 試験方法

平面接触状態における摩擦試験を以下の条件で実施した。荷重を 2 N、温度を 25 °C で一定となるように設定した。ハイドロゲルは粘弾性物質であるため、試験前に 30 分間予負荷を与え、変形が緩和する時間を設けた。その後、せん断速度 0.001 1/s で 1 分間のならしを行った後、せん断速度を 0.001 1/s から 10000 1/s まで連続的に変化させた。なお、せん断速度については、上部可動プレートの中心部から 5 mm の点での値を示している。点接触状態における摩擦試験は、荷重を 1 N、温度 25 °C、予負荷時間 1 時間とし、すべり速度を 10^{-5} から 10^3 mm/s まで連続的に変化させた。

3. 実験結果

図 3 は PBS 中、図 4 はタンパク質溶液中での結果を示す。なお平面接触状態の試験結果に関しては、試験片形状と回転速度から幾何学的に平均すべり速度を算出した。接触形態、溶液の種類に関わらず、すべり速度の上昇とともに摩擦係数が大きくなるという速度依存性が共通して見られた。それぞれの溶液において、2 つの接触状態での結果を比較すると、摩擦係数が最大となるピーク値に差があり、点接触の方が平面接触に比べてピーク値が小さい値となった。ここで、摩擦係数がピーク値を取った後に減少傾向に転じる点でのすべり速度を遷移速度とする。平面接触状態の方ではすべり速度が 500 mm/s 付近においても摩擦係数が増加傾向にあるが、点接触状態の方では 25 mm/s 付近で摩擦係数が減少傾向に転じ、遷移速度は小さな値を示した。

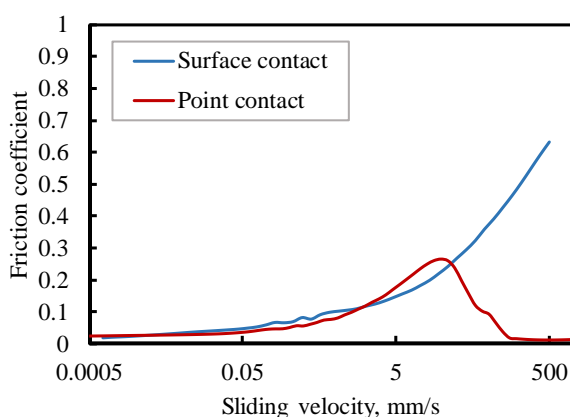


Fig. 3 The transition of friction coefficient in different contact configurations in PBS

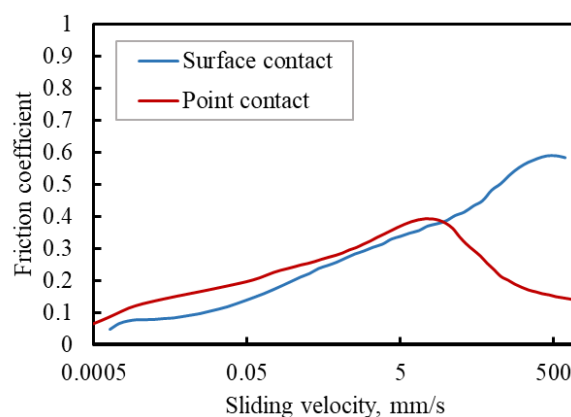


Fig. 4 The transition of friction coefficient in different contact configurations in protein solution

4. 考察

ゲルの摩擦では、吸着・反発モデル²⁾に基づくゲル特有の速度依存性を示すとされている。ゲル摩擦の吸着・反発モデルとは、ゲルと基板の間に引力が働く場合に、基板の動きに伴って吸着したゲルの高分子鎖が引き伸ばされ、やがて脱着するというモデルである。その際、高分子鎖が伸ばされる弾性力が摩擦力となって現れるため、すべり速度の増大に伴って摩擦力も大きくなるとされる。

今回行った摩擦試験では全ての接触形態および溶液中においてこのゲル特有の速度依存性を示しており、ゲル摩擦の吸着・反発モデルが成立すると考えられる。また、試験結果の摩擦係数が最大値を取るまでの区間における傾きを最小二乗法により算出したところ、以下の表 2 に示すような値となった。ただし、図 3、4 のデータを対数で処理した値を用いた。傾きの値は溶液ごとに大きく差が出ており、溶液中の成分がゲルの高分子鎖の脱吸着に影響し、摩擦挙動に影響を及ぼしたと考えられる。また、遷移速度については接触状態によって差が出ており、接触状態によって異なる接触面圧の大きさや面圧分布による影響であると考えられる。

Table 2 The slope of the transition of friction coefficient

	PBS	Protein solution
Surface contact	0.2594	0.2577
Point contact	0.1751	0.1393

文献

- 1) J.P.Paul: Force actions transmitted by joints in the human body, Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences, 192, 1107 (1976) pp.163-72.
- 2) J.P.Gong: Friction and lubrication of hydrogels-its richness and complexity, Soft Matter, 2, 7 (2006), pp.544-552.